УДК 681.518.54;004.3.001.4

В.А.ТВЕРДОХЛЕБОВ

Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия

СЛОЖНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПО ЗАДАННОМУ МАРШРУТУ

Сложность управления движением оценивается в трех вариантах: по свойствам маршрута, по свойствам объекта управления и по свойствам органа управления. Рассмотрен первый вариант и показана возможность совмещения характеристик и параметров маршрута, объекта управления и органа управления в единую систему показателей, на основании которых строится оценка сложности управления движением. Разработан метод получения числовых показателей их свойств – построение спектра показателей. В этом методе маршрут кодируется с использованием кодовых знаков, которые представляют геометрию маршрута (первый вариант), а также свойства объекта движения и органа управления (второй и третий варианты). В качестве числовых показателей используются значения параметров, характеризующие код маршрута при определении маршрута рекуррентными формами. Рекуррентные формы рассматриваются как модели правил управления. Приведены примеры оценки сложности управления движением по заданному маршруту.

Ключевые слова: *код маршрута, рекуррентная форма, автомат, спектр параметров, сложность управления, геометрический образ законов функционирования*

Введение

Основные положения, модели и методы оценки сложности управления движением по заданному маршруту содержится в работах [1 – 3].

Оценка сложности управления движением по известному маршруту, основывающаяся только на свойствах маршрута, может быть получена в результате построения и анализа математической модели маршрута. Базовыми показателями для оценки правила управления движением выбраны порядок рекуррентной формы, длина части кода, определяемого отдельной рекуррентной формой, и число смен рекуррентных форм при определении кода маршрута в целом. Эти числовые показатели систематизированы и представлены математической структурой в форме многоуровневого спектра, каждый следующий уровень которого расширяет и углубляет характеристики сложности управления.

1. Связи рекуррентных форм и правил управления движением

Код маршрута состоит из базовых знаков, каждый из которых имеет интерпретацию как представитель специфических свойств отдельных участков маршрута. Реальному маршруту, проектируемому на абстрактную (математическую) плоскость, придается вид ломаной линии. Свойства объекта движения и свойства органа управления могут быть представлены на основе расширения кода и его интерпретации. В случаях, когда учитываются свойства объекта движения и органа управления каждый кодовый знак c заменяется другим знаком c' или конструкцией из новых знаков $c_1\, c_2 ... c_k$. На рис. 1 представлен маршрут

$$\alpha = a_0, b_{11},..., b_{1n_1}, a_1, b_{21},..., b_{2n_2},$$
$$a_2,..., a_{k-1}, b_{k1},..., b_{kn_k}, a_k$$

движения с разбиением его на участки вида $a_{i-1}, b_{i1},..., b_{in_i}$, для движения по каждому из которых применяется правило P_i.

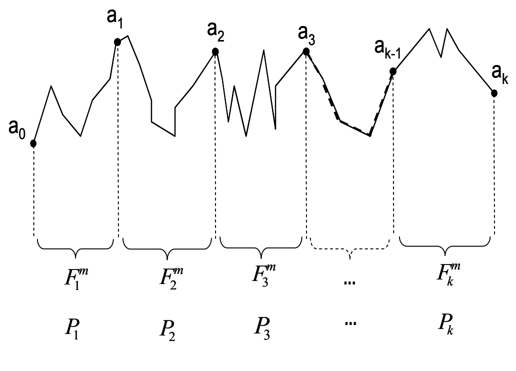

Рис.1. Схема разбиения маршрута на участки с сопоставлением рекуррентных форм $F_i^m, 1 \le i \le k$, правилам P_i управления движением по участкам.

Такие правила формализованы рекуррентными формами F_i^m, что позволяет свойства участков маршрута рассматривать как свойства рекуррентных форм. Всему маршруту сопоставляется код

© В.А. Твердохлебов

$$\alpha = a_0, b_{11}, ..., b_{1n_1}, a_1, b_{21}, ..., b_{2n_2},$$
$$a_2, ..., a_{k-1}, b_{k1}, ..., b_{kn_k}, a_k.$$

Рекуррентная форма

$$z_t = F(z_{t-m}, z_{t-m+1}, ..., z_{t-1}), \text{ где } t > m,$$

при соответствующем m определяет код маршрута, а при меньших m возможно, часть кода маршрута. Учёт свойств объекта движения и свойств органа управления требует замены кода α на коды

$$\alpha' = a'_0, b'_{11}, ..., b'_{1n_1}, a'_1, b'_{21}, ..., b'_{2n_2},$$
$$a'_2, ..., a'_{k-1}, b'_{k1}, ..., b'_{kn_k}, a'_k$$

или расширенный код α''. Соответственно корректируются правила управления движением.

2. Спектр динамических параметров, характеризующих структуру последовательности

В качестве основной характеристики свойств последовательности, являющейся кодом маршрута, разработан спектр $\Omega(\xi)$ динамических параметров, представляющих правила построения последовательности с использованием рекуррентных форм различных порядков. Для этого рассматриваемой последовательности кодовых знаков $\xi = \langle u(1), u(2), …, u(t), … \rangle$ сопоставляются рекуррентные формы $F(z_1, z_2,…, z_m) = z_{m+1}$, у которых z_i, $1 \le i \le m+1$, принимают значения из множества V кодовых знаков, сопоставленных отдельным базовым участкам маршрута. Последовательность ξ (код маршрута) определяется рекуррентной формой F (или последовательностью рекуррентных форм) по правилу: для любого t, t>m, F(u(t-m), u(t-m+1), …, u(t-1))=u(t). При предполагаемом конечном множестве U рекуррентные формы любых порядков задаются эффективно.

Спектр $\Omega(\xi)$ для последовательности ξ имеет 5 уровней: $\Omega(\xi) = (\Omega_0(\xi), \Omega_1(\xi), \Omega_2(\xi), \Omega_3(\xi), \Omega_4(\xi))$, на которых числовыми значениями представлены порядки рекуррентных форм, длины отрезков последовательности, определяемые отдельными рекуррентными формами и количества смен рекуррентных форм. По определению $\Omega_0(\xi) = m_0(\xi)$, где $m_0(\xi)$ - наименьший порядок рекуррентной формы, определяющей всю последовательность ξ. На уровне $\Omega_1(\xi)$ спектра $\Omega(\xi)$ расположено m_0 чисел ($m_0 \in N^+$), определяющих для порядков от 1 до m_0 размеры наибольших определяемых начальных отрезков последовательности ξ. Уровень $\Omega_2(\xi)$ содержит m_0 чисел, показывающих, сколько раз для рассматриваемого порядка рекуррентных форм потребовалось заменять рекуррентные формы при определении последовательности ξ. На уровне $\Omega_3(\xi)$ каждое число смен рекуррентных форм, показанное на уровне $\Omega_2(\xi)$, заменено длинами отрезков последовательности ξ, определяемых отдельными рекуррентными формами.

С использованием введенных обозначений спектр $\Omega(\xi)$ имеет структуру:

$$\Omega_0(\bar{\xi}) = \langle m_0(\bar{\xi}) \rangle;$$
$$\Omega_1(\bar{\xi}) = \left\langle d^1(\bar{\xi}), d^2(\bar{\xi}), ..., d^{\alpha}(\bar{\xi}) \right\rangle;$$
$$\Omega_2(\bar{\xi}) = \left\langle r^1(\bar{\xi}), r^2(\bar{\xi}), ..., r^{\alpha}(\bar{\xi}) \right\rangle;$$
$$\Omega_3(\bar{\xi}) = \left\langle \Omega_3^1(\bar{\xi}), \Omega_3^2(\bar{\xi}), ..., \Omega_3^{\alpha}(\bar{\xi}) \right\rangle,$$

где $\alpha = m_0(\bar{\xi})$ и $\Omega_3^j(\bar{\xi}) = \left\langle d_1^j(\bar{\xi}), d_2^j(\bar{\xi}), ..., d_{n_j}^j(\bar{\xi}) \right\rangle$

(n_j – номер последнего отрезка в определении последовательности $\bar{\xi}$ как последовательности отрезков, определяемых отдельными рекуррентными формами порядка j); $\Omega_4(\bar{\xi}) = \Theta(\Omega_3(\bar{\xi}))$, где Θ – оператор замены в $\Omega_3(\bar{\xi})$ величин длин отрезков весами использованных рекуррентных форм для определения отрезков. Четвёртый уровень $\Omega_4(\bar{\xi})$ спектра $\Omega(\bar{\xi})$ к характеристике последовательности $\bar{\xi}$ по количеству изменений правил, определяющих взаиморасположение элементов в последовательности, и величинам областей действия правил, представленной на уровнях $\Omega_1(\bar{\xi})$ - $\Omega_3(\bar{\xi})$, добавляет оценки сложности самих правил. В достаточно общем случае можно вводить веса правил (рекуррентных форм) и веса конкретных реализаций правил, используемых при определении конкретных отрезков. Первые четыре уровня $\Omega_0(\xi)$, $\Omega_1(\xi)$, $\Omega_2(\xi)$ и $\Omega_3(\xi)$ спектра $\Omega(\xi)$ характеризуют сложность маршрута на основе структуры кода маршрута и действия рекуррентных форм при определении кода маршрута. Рекуррентные формы сопоставляются правилам управления движением по маршруту и его участкам, то есть рекуррентные формы являются математическими моделями абстрактных правил управления движением по маршруту. Иерархическое построение спектра позволяет конструировать оценки сложности управления движением по заданному маршруту, углубляющие учет свойств маршрута при переходе от предыдущего уровня к следующему уровню спектра.

3. Пример построения спектра для конкретного маршрута

В работе [1] рассмотрен код маршрута планетохода, в котором выделены отдельные участки и виды препятствий: камни, ступенчатые препятствия, рвы, кратеры и т.п. После буквенного кодирования участков для геометрического представления маршрута планетохода (см. рис. 2) получен код $\xi = c_5\, k_{15}\, c_7\, e_{19}\, e_{19}\, e_{19}\, c_7\, c_8\quad c_8\quad c_8\quad c_6\quad v_9\, c_8\quad c_8\quad c_8\quad c_5\, e_{19}\, c_7\, e_{19}\, e_{19}\, c_5\, e_{19}\, e_{19}\, e_{19}\, b_1\, c_5\, e_{19}\, v_9\, c_{19}\, c_7$, соответствующий мнемонической форме маршрута ξ' = (, , , —, —, —, , , , , , , , , , , —, , —, —, , —, —, —, , , —, , —,).

В работе [4] указывается, что «одним из основных факторов, определяющих условия эксплуатации планетоходов, является рельеф поверхности планет, характеристики которого существенно влияют на конструкцию планетохода и методы его расчёта. Для решения задач динамики движения целесообразно рельеф рассматривать в виде моделей различных по геометрии неоднородностей поверхности, являющихся причиной тех или иных, динамических процессов в системе "планетоход-поверхность" (с.14)». Там же отмечается, что "…рельеф следует классифицировать как описательно… так и качественно по геометрическим размерам преодолеваемых планетоходом неоднородностей (с.15)."

Оценка сложности управления движением по заранее известному маршруту с использованием спектра показателей, введенного в п.2 , включает следующие этапы:

I этап. Построение кода маршрута

II этап. Построение функций $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, отображающих показатели уровней $\Omega_0, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ в R^+ (множество положительных чисел).

III этап. Последовательная по значениям $t = 0,1,2,3$ проверка отношений $\varphi_t(\xi) < \varphi_t(\xi')$ и $\varphi_t(\xi) = \varphi_t(\xi')$ для рассматриваемых кодов ξ и ξ' анализируемых маршрутов. По выявленному неравенству определяется более сложный по управлению движением маршрут. Если при всех предусмотренных значениях t выполняется равенство, то реализуются следующие этапы.

IV этап. Построение системы весов для каждых рассматриваемых рекуррентной формы F и набора значений

$(u(1), u(2),\ldots, u(m)$ и $F(u(1), u(2),\ldots, u(m)))$

в определении рекуррентной формы.

V этап. Построение функции $\psi(F, \langle\xi\rangle)$, где $\langle\xi\rangle$ – множество наборов значений $(u(1), u(2),\ldots, u(m),\ F(u(1), u(2),\ldots, u(m)))$ использованных для определения отрезка $\langle\xi\rangle$ последовательности, которая принимает значения в множестве R^+. Число $\psi(F, \langle\xi\rangle)$ полагается оценкой сложности управления движением на отрезке $\langle\xi\rangle$ маршрута.

VI этап. Построение правил общей оценки для управления движением на всём маршруте ξ на базе использования оценок, полученных на этапе V.

В этом коде допускают представление типы препятствий. Высота H холма, ступенчатого препятствия или камня, а также ширина L рва или кратера, расстояние между граничными точками в основании холма должны учитываться при оценки препятствия.

Последовательность ξ' определяет 11 прямолинейных участков, 5 спусков и 10 подъемов, 2 рва, 1 холм и 1 кратер. Кроме этого, анализ последовательности ξ' позволяет приближенно выявлять свойства маршрута: маршрут содержит два участка продолжительного прямолинейного движения (знаки с номерами 4 - 6 и 17-19), два участка продолжительного подъема (знак с номерами 7-10 и 13-15), один спуск и подъем из глубокого кратера (знаки с номерами 1-3), … и т.п.

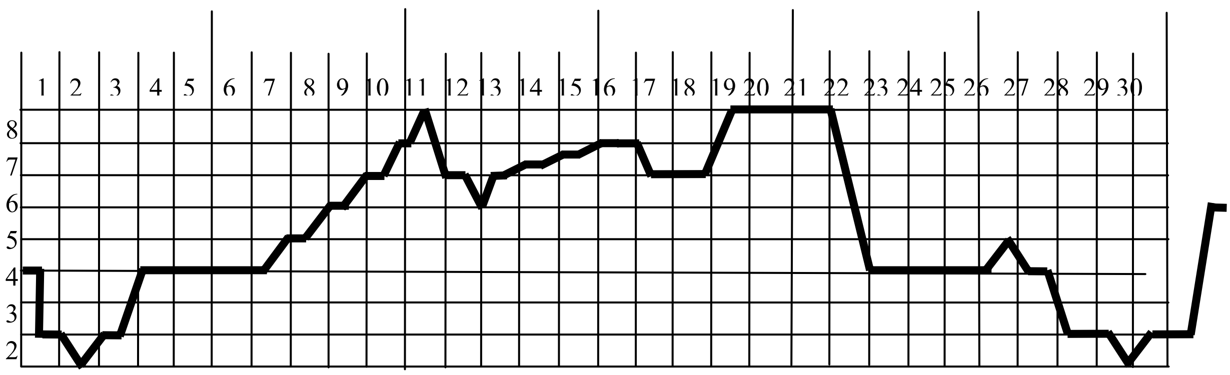

Рис.2. График продольно-вертикального разреза рельефа в районе эксплуатации "Лунохода - 1". (грубая схема рис.1.4 работы [1], с.29).

Варианты кодирования маршрута движения рассмотрим на примере оценки сложности управления движением подводной лодки с использованием описания функционирования подлодки, приведенного популярно и упрощенно в работе [5]. Управление движением и функционированием подлодки в целом осуществляется через выполнение стандартных операций членами экипажа и автоматическими устройствами. Выполнение сложных стандартных операций подготавливается и обеспечивается в интервалы времени, предшествующие операциям. Это подтверждает правомерность использования математического аппарата рекуррентных форм для представления и анализа кодов маршрутов, т.е. сложность управления движением на участке связана с действиями на предыдущих участках. Перед отплытием подлодки должны быть осуществлены мероприятия, подготавливающие возможность отплытия, которые обеспечивают, например, следующие свойства подлодки: «…электроустановка работает в нормальном режиме, охлаждающие насосы работают на малой скорости, …, вал вращается, …, все проверки перед отплытием выполнены, …, все подразделения готовы к погружению, кроме палубы и мостика … ([5],с.21) ». В код маршрута следует включать действия, обеспечивающие функционирование подлодки, например, «запуск реактора, запуск машинного отделения, подготовку комнаты сонарного оборудования и т.д. ([5], с.7)».

В третьем варианте кодирования в коде маршрута, используемом при оценке сложности управления движением, свойства и особенности органа управления характеризуются человеческим звеном (командир, помощник командира, дежурный офицер, рулевой, …), распределением действий по выполнению стандартных операций между операторами и автоматами, структурой размещения компонент органа управления и т.п.

Эти факторы представляются в коде маршрута вторым дополнением знаков и их интерпретации.

4. Геометрические образы поведения автоматов и их связь с кривыми линиями

В качестве математической модели движущегося объекта рассмотрим дискретную детерминированную динамическую систему в форме автомата A=(S, X, Y, δ, λ), где S, X и Y – множества состояний, входных и выходных сигналов, а δ и λ – функции переходов и выходов. Автомат A функционирует в абстрактном целочисленном неотрицательном времени в соответствии с уравнениями динамики: $s(t+1)=\delta(s(t),x(t))$ и $y(t)=\lambda(s(t),x(t))$. Множеством состояний полагается множество $S=\{s_p\}_{p\in X^*}$, на котором функция δ определяется по правилу: для любых $p\in X^*$ и $x\in X$ $\delta(s_p,x)=s_{px}$. Функция λ распространяется до функции вида $\lambda':S\times X^*\to Y$, где $\lambda'(s_p, q)$ – последний выходной сигнал инициального автомата (A, s_ε), выданный при его реакции на входную последовательность pq. Для автомата (A, s_ε) определяется автоматное отображение $\rho_{s_\varepsilon}=\bigcup_{p\in X^*}\{(p,\lambda'(s_\varepsilon,p))\}$, которое после введения линейного порядка ω_1 на множестве X^* и линейного порядка ω_2 на Y превращается в график $(\rho_{s_\varepsilon},\omega_1,\omega_2)$ в системе координат с осью абсцисс (X^*,ω_1) и осью ординат (Y,ω_2). График $(\rho_{s_\varepsilon},\omega_1,\omega_2)$ называется геометрическим образом инициального автомата (A, s_ε). Линейные порядки ω_1 и ω_2, имеющие по построению первые элементы, позволяют каждую точку (p, y) с символьными координатами графика $(\rho_{s_\varepsilon},\omega_1,\omega_2)$ заменить точкой $(r_1(p), r_2(y))$ с целочисленными координатами – номерами p и y по порядкам ω_1 и ω_2. В результате получаем числовой график G, то есть геометрический образ γ_{s_ε} автомата (A, s_ε), который можно изоморфно вложить в первый квадрант декартовой системы координат на плоскости. Конкретные варианты функционирования автомата (A, s_ε) определяются сечениями графиков, соответствующих символьным или числовым геометрическим образам (см. рис.3).

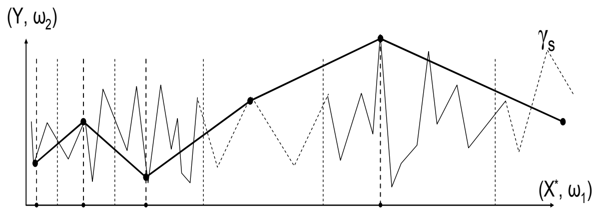

Рис.3. Геометрический образ (сплошная ломаная) конкретного функционирования автомата как сечение общего геометрического образа γ_s по точкам, первые координаты которых являются префиксами прикладываемой входной последовательности.

Интерпретации оси абсцисс (X^*,ω_1) позволяют рассматривать *X* как управляющее воздействие, состояния автомата – как точки на маршруте, а величины на оси ординат (Y,ω_2) как показатели сложности управления движением на участке от одной точки (состояния $s(t)$) до другой точки (состояния $s(t+1)$). Элементы теории построения и анализа свойств геометрических образов законов функционирования автомата предложены и развиты в работах [1, 2, 6].

Краткие выводы

Предложен подход к оценке сложности управления движением по заданному маршруту, при реализации которого определяются характерные стандартные участки маршрута и их коды, для кода маршрута вычисляются числовые показатели, представляющие свойства ломаной линии, сопоставленной маршруту.

Разработан специальный спектр таких числовых показателей. Сложность правил управления движением рассматривается по числовым показателям рекуррентных форм, определяющих последовательность знаков и интерпретируемых как правила управления движением.

Литература

1. Твердохлебов В.А. Геометрические образы законов функционирования автоматов / В.А. Твердохлебов. – Саратов: ООО Издательство «Научная книга», 2008. – 183 с.

2. Твердохлебов В.А. . Спектры числовых характеристик фазовых картин объектов диагностирования / В.А. Твердохлебов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – № 5 (31). – С. 148-155.

3. Твердохлебов В.А. Метод оценки сложности управления движением по известному маршруту / В.А. Твердохлебов // Доклады академии военных наук. –Саратов, 2008. – № 5 (34). – С. 93-102.

4. Авотин Е.В. Динамика планетохода / Е.В. Авотин, И.С. Болховитинов, А.Л. Кемурджиан, М.И. Маленков, Ф.П. Шпак. – М.: Наука, 1978. – 438 с.

5. ДиМеркурио М. Подводные лодки / М. ДиМеркурио, М. Бенсон. – М.: АСТ «Астрель», 2007. – 330 с.

6.Твердохлебов В.А. Геометрические образы конечных детерминированных автоматов / В.А. Твердохлебов // Известия Саратовского ун-та (Новая серия). – Саратов, 2005. – Т. 5, вып. 1. – С. 141-153.

Поступила в редакцию 3.02.2009

Рецензент: д-р техн. наук, заведующий кафедрой компьютерных и информационных технологий и систем О.Л. Ляхов, Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка, Полтава, Украина.

СКЛАДНІСТЬ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ПО ЗАДАНОМУ МАРШРУТУ

В.О. Твєрдохлєбов

Складність управління рухом оцінюється в трьох варіантах: по властивостях маршруту, по властивостях об'єкту управління і по властивостях органу управління. Розглянутий перший варіант і показана можливість поєднання характеристик і параметрів маршруту, об'єкту управління і органу управління в єдину систему показників, на підставі яких будується оцінка складності управління рухом. Розроблений метод отримання числових показників їх властивостей – побудова спектру показників. У цьому методі маршрут кодується з використанням кодових знаків, які представляють геометрію маршруту (перший варіант), а також властивості об'єкту руху і органу управління (другий і третій варіанти). Як числові показники використовуються значення параметрів, які характеризують код маршруту при визначенні маршруту рекурентними формами.

Ключові слова: код маршруту, рекурентна форма, автомат, спектр параметрів, складність управління, геометричний образ законів функціонування.

COMPLEXITY OF MANAGEMENT OF MOVEMENT ON THE SET ROUTE

V.A. Tverdokhlebov

The evaluation procedure of complexity of a traffic control on the set route is offered. In an estimation numerical indexes of complexity of rules of control on separate plots of a route, amount of changes of rules of control and lengths of plots of a route on which separate rules act without modifications are considered. Rules of control are formalized on the basis of their introducing by the recurrent shapes defining a code of a route. Numerical indexes of properties, performances and parameters of a route are systematized by means of the designed spectrum of parameters.

Key words: code of a route, the recurrent form, finite state machine, spectrum of parameters, complexity of management, geometrical image of laws of functioning.

Твердохлебов Владимир Александрович – д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Институт проблем точной механики и управления Российской Академии Наук, Саратов, Россия, e-mail: tverdokhlebovva@list.ru.